



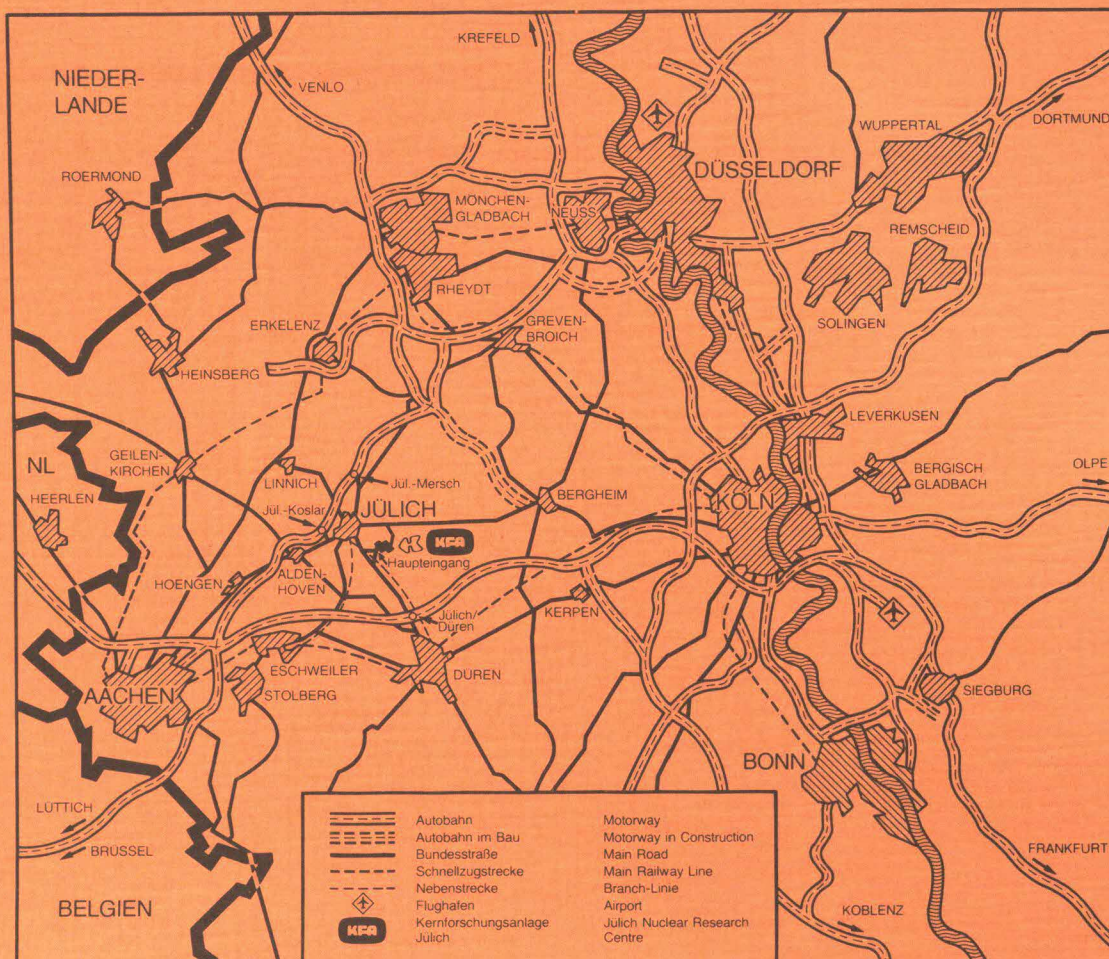
KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH GmbH

Institut für Reaktorbauelemente

**Ist eine globale Temperaturerhöhung
als Folge der zunehmenden atmosphärischen
CO₂-Konzentration vorhersagbar?**

von
Herbert Dötsch

Jül-Spez-329
August 1985
ISSN 0343-7639



Als Manuskript gedruckt

Spezielle Berichte der Kernforschungsanlage Jülich – Nr. 329
 Institut für Reaktorbauelemente Jül-Spez-329

Zu beziehen durch: ZENTRALBIBLIOTHEK der Kernforschungsanlage Jülich GmbH
 Postfach 1913 · D-5170 Jülich (Bundesrepublik Deutschland)
 Telefon: 02461/610 · Telex: 833556-0 kf d

**Ist eine globale Temperaturerhöhung
als Folge der zunehmenden atmosphärischen
CO₂-Konzentration vorhersagbar?**

von
Herbert Dötsch

IS A RISE IN GLOBAL TEMPERATURE DUE TO THE
INCREASING ATMOSPHERIC CO₂ CONTENT
PREDICTABLE?

by
Herbert Dötsch

Abstract:

Significant changes in climate due to the intensive use of fossil fuels are often discussed today. It is the aim of this report, originating from a lecture, to point out the causal chain making possible a conclusion from CO₂ content of the atmosphere to climate. The author concentrates especially on the causal connexion between atmospheric CO₂ content and earth surface temperature. Since the evaluation by measurement of such a link is not (yet) possible, this connexion has to be derived on the basis of calculation models. Taking the example of a one-dimensional radiation/convection model the results of Ramanathan's calculation are discussed predicting a global temperature increase at the earth's surface of 2.2 K if the atmospheric CO₂ content is doubled. It is shown that only a small part of this temperature increase can be related directly to the infrared activity of CO₂. Further compensating and amplifying mechanisms render the prediction more difficult, but they do not discharge us from the responsibility of counteracting in good time the consequences of the CO₂ increase in the atmosphere.

IST EINE GLOBALE TEMPERATURERHÖHUNG ALS FOLGE
DER ZUNEHMENDEN ATMOSPHERISCHEN CO₂-KONZENTRATION
VORHERSAGBAR?

von
Herbert Dötsch

Kurzfassung:

Weitreichende Klimaveränderungen als Folge der intensiven Nutzung fossiler Brennstoffe werden heute häufig diskutiert. In dem vorliegenden Bericht, zusammengestellt anlässlich eines Vortrages, wird die kausale Kette, die den Schluß vom CO₂-Gehalt der Atmosphäre auf das Klima ermöglicht, vorgestellt. Der Verfasser widmet sich insbesondere der kausalen Verknüpfung zwischen atmosphärischem CO₂-Gehalt und der Erdoberflächentemperatur. Da die meßtechnische Erfassung eines solchen Zusammenhangs heute (noch) nicht möglich ist, ist die Verknüpfung nur auf der Grundlage von Modellrechnungen herzustellen. Am Beispiel des eindimensionalen Strahlungs-/Konvektionsmodells wird das Ergebnis der Rechnung von Ramanathan diskutiert, die für eine Verdopplung des atmosphärischen CO₂-Gehaltes eine globale Temperaturerhöhung von 2,2 K an der Erdoberfläche vorhersagt. Es wird gezeigt, daß nur ein kleiner Anteil dieser Temperaturerhöhung der Infrarot-Aktivität des CO₂ direkt zuzuschreiben ist; ein weitaus größerer Anteil resultiert aus Rückkopplungsmechanismen, die das Verhalten des Wasserdampfes beschreiben und durch einen CO₂-Anstieg ausgelöst werden. Weitere Kompensations- und Verstärkungsmechanismen erschweren die Vorhersage, entlassen uns aber nicht aus der Verantwortung, den Konsequenzen eines CO₂-Anstiegs in der Atmosphäre frühzeitig entgegenzuwirken.

"Mit der allmählichen Vermehrung der Kohlensäure in der Luft nähern wir uns hoffentlich einem gleichmäßigeren und günstigeren Klima, besonders in den kälteren Zonen. In den kommenden Zeiten wird vermutlich die Erde ins Vielfache gesteigerte Ernten zum Wohle des wachsenden Menschengeschlechtes ergeben."

(aus SVANTE ARRHENIUS
Erde und Weltall, 1926)

INHALTSVERZEICHNIS

Seite

1.	Allgemeiner Überblick zur CO ₂ /Klima-Problematik	1
2.	Bestimmung der effektiven Erdtemperatur	5
3.	Eindimensionales Strahlungs-/Konvektionsmodell zur Berechnung der Erdoberflächentemperatur	7
3.1	Beschreibung des Rechenweges	9
3.2	Isolierte Betrachtung des CO ₂ -Effektes	11
3.3	Rückkopplungsmechanismen	15
3.4	Begleitende Kompensations- und Verstärkungsmechanismen	17
4.	Zusammenfassung	18

1. Allgemeiner Überblick zur CO₂/Klima-Problematik

Die optimistische Einschätzung der Konsequenzen eines atmosphärischen CO₂-Anstiegs, wie sie Svante Arrhenius /1/ noch 1926 vertrat, hat heutzutage Platz gemacht einer eher pessimistischen Zukunftsperspektive, die auf den gleichen prinzipiellen Zusammenhang zurückgreift, eine CO₂-bedingte globale Klimaänderung. Beiden Überlegungen liegt die Vorstellung zugrunde, daß eine Klimaänderung als Folge einer globalen Temperaturerhöhung eintritt. Gibt es nun einen solchen kausalen Zusammenhang, dann schließt sich sogleich die Frage an, ob sich dieser mathematisch so formulieren läßt, daß wir für künftige CO₂-Gehalte eine zuverlässige Prognose der Erdoberflächentemperatur anstellen können. Ich möchte versuchen, Ihnen im Rahmen dieses Vortrages am Beispiel der Rechnung Kriterien zu vermitteln, die für die Beantwortung der im Thema gestellten Frage von entscheidender Bedeutung sind.

Die Verbrennung fossiler Energieträger und eine zunehmende Zerstörung der Landvegetation, beispielsweise durch Waldrodung in den Entwicklungsländern, sind Hauptursachen des Anstiegs der atmosphärischen CO₂-Konzentration. Durch die Rodung wird zum einen eine wichtige Kohlendioxidsenke geschwächt, zum anderen wird durch das Verbrennen des Holzes zusätzlich CO₂ freigesetzt.

Die Nutzung fossiler kohlenstoffhaltiger Brennstoffe, wie Kohle, Erdöl und Erdgas, hat in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts eine Größenordnung erlangt, die eine deutlich meßbare Änderung des atmosphärischen CO₂-Gehaltes erwarten läßt. So wurde beispielsweise etwa die Hälfte des gesamten vom Menschen produzierten Kohlendioxids in den letzten 20 Jahren erzeugt. Kontinuierliche Messungen, die seit 1956 von Keeling /2/ durchgeführt wurden, zeigen den erwarteten CO₂-Anstieg (siehe Bild 1).

Beide Meßreihen - die eine wurde aufgenommen auf dem Mauna Loa auf Hawaii, die andere am Südpol - ergaben etwa den gleichen mittleren Konzentrationsverlauf in der Atmosphäre; die große Amplitude der hawaii'anischen Messung ist die Folge des jährlichen Vegetationszyklus. Der Vergleich der Meßreihen an verschiedenen Orten läßt bereits eine für die Rechnung wichtige Annahme zu, die der homogenen Verteilung des Kohlendioxids in der

Atmosphäre. Der beobachtete Anstieg entspricht etwa 55% der in dieser Zeit anthropogen erzeugten CO_2 -Menge /3/ und zeigt, daß die Aufnahmeraten der wichtigen Kohlendioxidsenken, der Vegetation und der Ozeane, begrenzt ist.

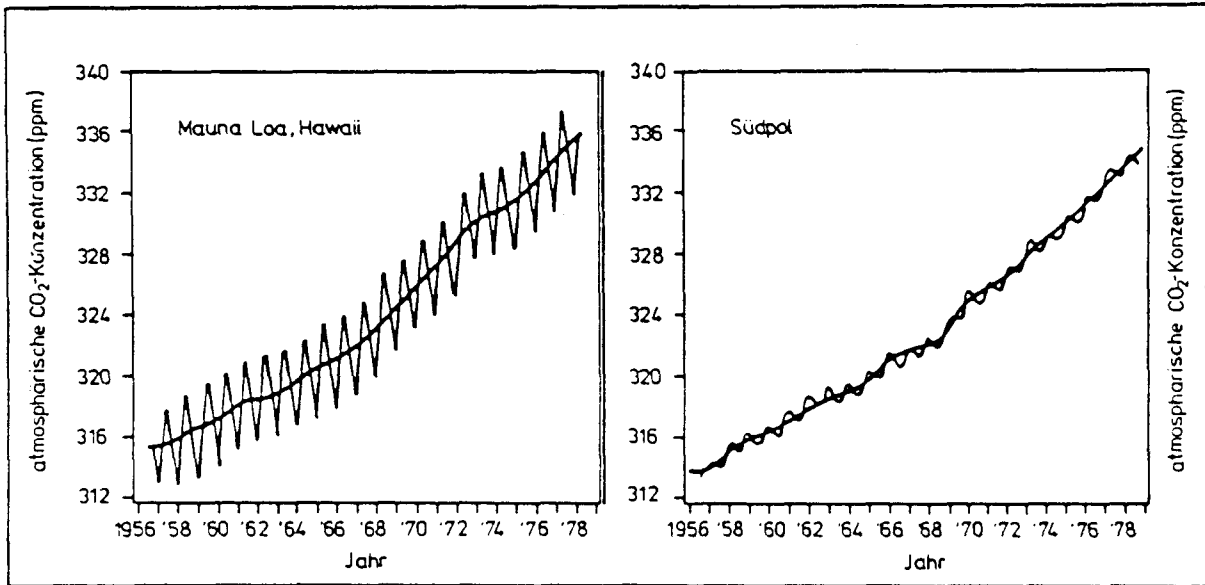


Bild 1: Zunahme des CO_2 -Gehaltes in der Atmosphäre nach den Messungen von Keeling et al. /2/

Ausgehend von der jetzigen Konzentration, die bei etwa 340 ppm liegt, läßt sich der zukünftige Verlauf bei einer Aufnahme von 55% des gesamten freiwerdenden CO_2 durch die Atmosphäre für verschiedene Wachstumsraten prognostizieren (Clark /4/). Die Prognose geht aus von einer gleichbleibenden Struktur des Primärenergieangebotes. Bevölkerungswachstum und die damit verbundene Steigerung des Energiebedarfs auf der einen Seite und die Preisentwicklung der verschiedenen Primärenergieträger auf der anderen, machen eine Prognose der CO_2 -Emission jedoch extrem schwierig. Tatsache ist aber, daß für die getroffenen Annahmen auch bei einem Nullwachstum ein Anstieg von über 1,5 ppm pro Jahr und eine Verdopplung des atmosphärischen CO_2 -Gehaltes in etwa 200 Jahren zu erwarten wäre. Eine solche Verdopplung läge bei einer Zunahme der CO_2 -Produktion um 4,5% pro Jahr bereits nach etwa 30 Jahren vor. Die aktuellen Steigerungsraten bewegen sich nach Rotty /5/ zwischen einem und zwei Prozent pro Jahr und würden zu einer Verdopplung des CO_2 -Gehaltes in etwa 70 Jahren führen.

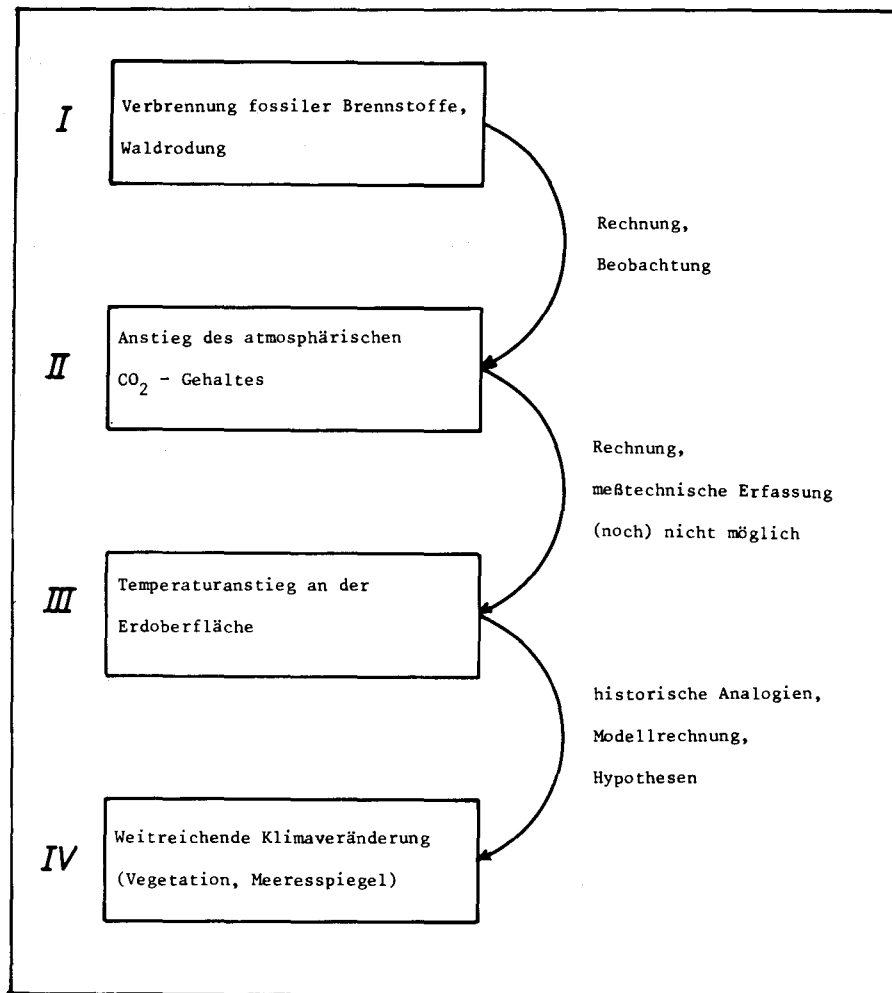


Bild 2: Kausale Kette zur CO₂/Klima-Problematik

Wenn man sich nun die kausale Kette der CO₂/Klima - Problematik vor Augen hält (siehe Bild 2), dann läßt sich sagen, daß ein ursächlicher Zusammenhang zwischen der intensiven Nutzung fossiler Brennstoffe und dem Anstieg der atmosphärischen CO₂-Konzentration durch Rechnung und Messung nachgewiesen wurde.

Was sind nun die Konsequenzen eines solchen Anstiegs? Der Schritt von II nach III in Bild 2 wird im allgemeinen als Treibhauseffekt bezeichnet und fußt auf der gesicherten Erkenntnis, daß CO₂ im infraroten Wellenlängenbereich Strahlung absorbiert, in genau dem Wellenlängenbereich, in dem die Erde ihre maximale Strahlungsintensität besitzt. Demgegenüber ist CO₂ im sichtbaren Bereich, in dem die Sonne ihre maximale Strahlungsintensität hat, nahezu transparent. Das führt dazu, daß die Sonnenstrahlung, von

Kohlendioxid fast unbehindert, die Erdoberfläche erreicht, dort absorbiert wird, und daß die von der Erde emittierte Wärmestrahlung beim Durchgang durch die Atmosphäre behindert wird durch CO_2 . Die Konsequenz wäre ein Temperaturanstieg an der Erdoberfläche, die dem Anstieg des atmosphärischen CO_2 folgt. Wegen der relativ großen Schwankung der Jahresmitteltemperatur von 0,5 Grad läßt sich ein solcher Trend meßtechnisch heute noch nicht bestätigen.

Gibt es aber einen solchen Temperaturanstieg an der Erdoberfläche, dann ist, je nach Ausmaß dieser Änderung, mit weitreichenden Klimaveränderungen zu rechnen. Diese können regional durchaus positiv sein, um noch einmal auf das Arrhenius Zitat zurückzukommen. Als mögliche globale Folgen werden in der aktuellen Literatur jedoch diskutiert:

- die Verlagerung von Klimaregionen und Niederschlagsgebieten und damit verbunden eine globale Verschlechterung der landwirtschaftlichen Erträge,
- der Anstieg des Meeresspiegels und die Überschwemmung von heute dicht besiedelten Gebieten und
- schließlich als Folge der genannten Punkte weitreichende gesellschaftliche Auswirkungen.

Überlegungen dieser Art basieren auf historischen Analogien, Modellrechnungen und Hypothesen. Unklar ist noch, welches Ausmaß der Temperaturerhöhung als kritischer Schwellwert anzusehen ist. Treten "katastrophale" Folgen schon bei 2 Grad oder erst bei 5 Grad Temperaturerhöhung an der Erdoberfläche auf?

Ich möchte meine weiteren Ausführungen der Verknüpfung von atmosphärischem CO_2 -Gehalt und Erdoberflächentemperatur widmen, da wir uns bei diesem Glied der kausalen Kette heutzutage nur auf die Rechnung stützen können, und da die Prognose der CO_2 -Auswirkungen durch diese Rechnung erst ermöglicht wird.

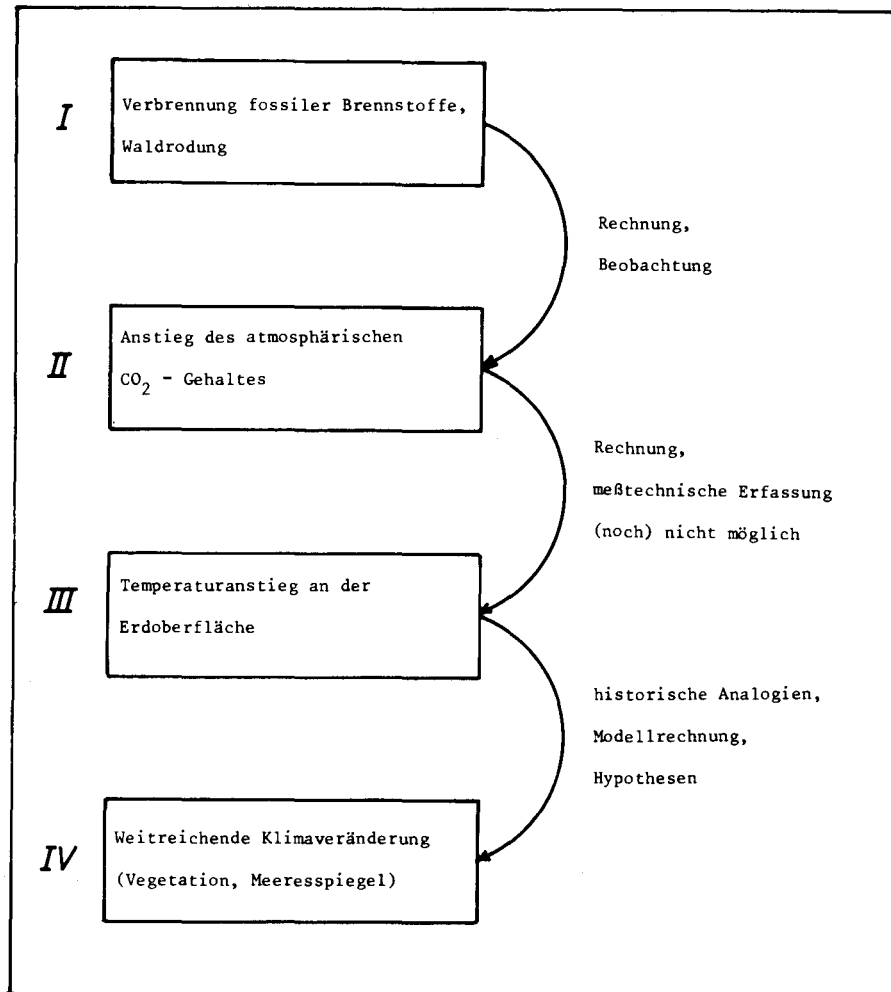


Bild 2: Kausale Kette zur CO₂/Klima-Problematik

Wenn man sich nun die kausale Kette der CO₂/Klima - Problematik vor Augen hält (siehe Bild 2), dann läßt sich sagen, daß ein ursächlicher Zusammenhang zwischen der intensiven Nutzung fossiler Brennstoffe und dem Anstieg der atmosphärischen CO₂-Konzentration durch Rechnung und Messung nachgewiesen wurde.

Was sind nun die Konsequenzen eines solchen Anstiegs? Der Schritt von II nach III in Bild 2 wird im allgemeinen als Treibhauseffekt bezeichnet und fußt auf der gesicherten Erkenntnis, daß CO₂ im infraroten Wellenlängenbereich Strahlung absorbiert, in genau dem Wellenlängenbereich, in dem die Erde ihre maximale Strahlungsintensität besitzt. Demgegenüber ist CO₂ im sichtbaren Bereich, in dem die Sonne ihre maximale Strahlungsintensität hat, nahezu transparent. Das führt dazu, daß die Sonnenstrahlung, von

Kohlendioxid fast unbehindert, die Erdoberfläche erreicht, dort absorbiert wird, und daß die von der Erde emittierte Wärmestrahlung beim Durchgang durch die Atmosphäre behindert wird durch CO_2 . Die Konsequenz wäre ein Temperaturanstieg an der Erdoberfläche, die dem Anstieg des atmosphärischen CO_2 folgt. Wegen der relativ großen Schwankung der Jahresmitteltemperatur von 0,5 Grad läßt sich ein solcher Trend meßtechnisch heute noch nicht bestätigen.

Gibt es aber einen solchen Temperaturanstieg an der Erdoberfläche, dann ist, je nach Ausmaß dieser Änderung, mit weitreichenden Klimaveränderungen zu rechnen. Diese können regional durchaus positiv sein, um noch einmal auf das Arrhenius Zitat zurückzukommen. Als mögliche globale Folgen werden in der aktuellen Literatur jedoch diskutiert:

- die Verlagerung von Klimaregionen und Niederschlagsgebieten und damit verbunden eine globale Verschlechterung der landwirtschaftlichen Erträge,
- der Anstieg des Meeresspiegels und die Überschwemmung von heute dicht besiedelten Gebieten und
- schließlich als Folge der genannten Punkte weitreichende gesellschaftliche Auswirkungen.

Überlegungen dieser Art basieren auf historischen Analogien, Modellrechnungen und Hypothesen. Unklar ist noch, welches Ausmaß der Temperaturerhöhung als kritischer Schwellwert anzusehen ist. Treten "katastrophale" Folgen schon bei 2 Grad oder erst bei 5 Grad Temperaturerhöhung an der Erdoberfläche auf?

Ich möchte meine weiteren Ausführungen der Verknüpfung von atmosphärischem CO_2 -Gehalt und Erdoberflächentemperatur widmen, da wir uns bei diesem Glied der kausalen Kette heutzutage nur auf die Rechnung stützen können, und da die Prognose der CO_2 -Auswirkungen durch diese Rechnung erst ermöglicht wird.

2. Bestimmung der effektiven Erdtemperatur

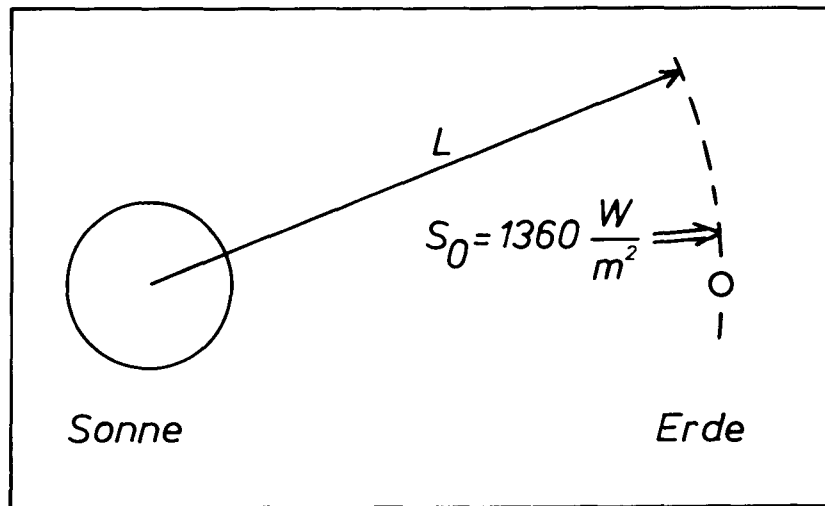


Bild 3: Planetares Modell zur Bestimmung der effektiven Erdtemperatur

Bei der Bestimmung der effektiven Erdtemperatur möchte ich zunächst ausgehen von einem sehr einfachen planetaren Modell, das es uns bereits erlaubt, den Einfluß einiger wichtiger Größen abzuschätzen. Der Hauptenergie-lieferant der Erde ist die Sonne. Die Strahlungsdichte der Sonne auf einer fiktiven Kugel mit dem Radius L , der der mittleren Entfernung zwischen Erde und Sonne entspricht, ist bekannt als Solarkonstante S_0 , die im Jahres-mittel 1360 W pro m^2 dieser gedachten Kugel entspricht. Diese Strah-lungsleistung wird jedoch nicht vollständig von der Erde absorbiert; ein Teil der einfallenden Sonnenstrahlung wird in der Atmosphäre und an der Erdoberfläche reflektiert. Der reflektierte Anteil, die sogenannte Erd-albedo A , wird in der Literatur mit 29% angegeben /6/.

$$A = \frac{\text{reflektierter Anteil von } S_0}{S_0}$$

$$A = 0,29$$

Die Bestimmung der effektiven Erdtemperatur T_e erfolgt über die Gleichge-wichtsbedingung, die besagt, daß der absorbierte Anteil der solaren Strah-lungsleistung gleich ist der von der Erde emittierten Strahlungsleistung.

Dieses Gleichgewicht läßt sich beschreiben durch den Ansatz von Stefan-Boltzmann

$$\sigma T_e^4 = \frac{S_0}{4} (1-A)$$

Hierin ist $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ die sogenannte Boltzmann-Konstante; der Divisor 4 resultiert aus dem Verhältnis von projizierter zu wahrer Erdoberfläche. Mit den genannten Größen läßt sich nun die effektive Erdtemperatur T_e aus dieser Beziehung berechnen:

$$T_e = 255 \text{ K } (-18 \text{ } ^\circ\text{C})$$

Demgegenüber steht die örtlich und zeitlich gemittelte beobachtete Erdoberflächentemperatur T_s .

$$T_s = 288 \text{ K } (+15 \text{ } ^\circ\text{C})$$

Würde die terrestrische Strahlung beim Durchgang durch die Atmosphäre nicht behindert, müßte T_s gleich sein T_e . Somit ist die Differenz

$$\Delta T = T_s - T_e$$

ein Maß für die Durchlässigkeit der Atmosphäre. Ein eindrucksvolles Beispiel für diesen Zusammenhang liefert der Planet Venus. Hier beträgt die effektive Temperatur 220 K, die beobachtete jedoch 750 K. Die Differenz ΔT von 530 Kelvin läßt auf eine im Vergleich zur Erdatmosphäre geringere Transparenz der Venusatmosphäre schließen. Daß eine mögliche Ursache für die unterschiedliche Transparenz der Kohlendioxidgehalt der jeweiligen Atmosphäre ist, folgt aus dem Vergleich der Partialdrücke. Während an der Erdoberfläche, entsprechend den Messungen von Keeling, derzeit ein CO_2 -Partialdruck von 340 mbar vorherrscht, beträgt der entsprechende Wert an der Venusoberfläche etwa 90 bar.

Hilfreich wäre an dieser Stelle die Kenntnis eines effektiven Transmissionsgrades τ_e zur Beschreibung der atmosphärischen Durchlässigkeit, abhängig von der Wellenlänge der jeweiligen Strahlung. Qualitativ läßt sich sagen, daß dieser Transmissionsgrad umgekehrt proportional ist der besprochenen Temperaturdifferenz ΔT .

$$\tau_e \sim \frac{1}{\Delta T}$$

Neben der Wellenlänge ist τ_e eine Funktion von Druck, Temperatur und Gaszusammensetzung am jeweiligen Ort. Die Berechnung einer solchen effektiven Durchlässigkeit scheiterte jedoch bisher an der Komplexität des Problems. Unter Berücksichtigung der Ortsabhängigkeit einzelner Parameter ist daher eine detaillierte Betrachtung des Wärmetransportes durch die Atmosphäre erforderlich, die Gegenstand des folgenden Abschnittes sein wird.

3. Eindimensionales Strahlungs-/Konvektionsmodell zur Berechnung der Erdoberflächentemperatur

Das eindimensionale Strahlungs-/Konvektionsmodell ermöglicht die Studie des Wärmetransportes durch die Erdatmosphäre. Diese im Vergleich zu den Erdbmessungen hauchdünne Gashülle bewahrt die Erde davor, bis auf die zuvor berechnete effektive Temperatur abzukühlen. In einer kleinen Schicht dieser Gashülle an der Erdoberfläche, der Troposphäre, spielen sich alle Wettervorgänge ab, insbesondere befinden sich hier auch die Wolken. Die Dicke dieser Schicht liegt im Mittel bei 11 km. Die sich anschließende Schicht bis zu einer Höhe von etwa 100 km ist die sogenannte Stratosphäre. Während die Stratosphäre bei der Berechnung des Wärmedurchgangs nur hinsichtlich des Strahlungstransportes von Bedeutung ist, muß in der Troposphäre bei der Rechnung sowohl Strahlungstransport als auch konvektiver Wärmetransport berücksichtigt werden.

Ein wichtiger Ausgangspunkt für die Rechnung ist die Kenntnis des sogenannten stabilen Temperaturgradienten in der Troposphäre. Dessen obere Grenze läßt sich aus dem Energieerhaltungssatz berechnen, wenn man ein aufsteigendes trockenes Luftteilchen (Volumenelement) verfolgt. Die zur Änderung der potentiellen Energie erforderliche Änderung der thermischen

Energie führt in Bodennähe zu einem Temperaturgradienten von $-9,81 \text{ K/km}$, dem sogenannten trocken adiabaten Temperaturgradienten (Kurve (1) in Bild 4).

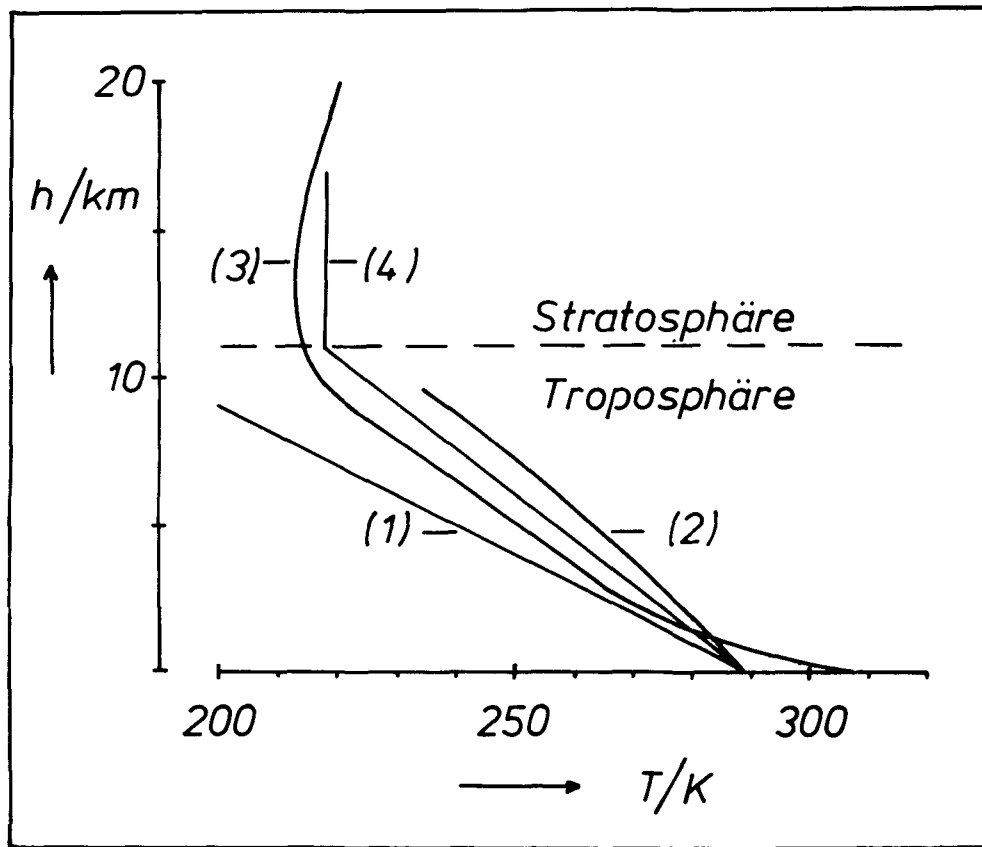


Bild 4: Mittlerer Temperaturverlauf in der Atmosphäre
aus Messung (4) und Rechnung (1, 2, 3)

Als untere Grenze kann der feucht adiabate Temperaturgradient (Kurve (2)) angesehen werden, der in Bodennähe etwa -5 K/km beträgt. Er läßt sich durch die entsprechende Rechnung für gesättigte feuchte Luft ermitteln. Der für die Berechnung des Wärmetransportes maßgebende Wert liegt zwischen diesen Grenzen und beträgt bei der sogenannten US-Standardatmosphäre $-6,5 \text{ K/km}$ (Kurve (4)), ein zeitlich und örtlich gemittelter Beobachtungswert. Die Kurve (3) in Bild 4 entspricht dem Temperaturverlauf, der sich aus einer Strahlungsgleichgewichtsrechnung ergibt. Diese Rechnung basiert auf der Annahme, daß die in einer Atmosphärenschicht absorbierte Strahlungsleistung

ausschließlich in Form von emittierter Strahlungsleistung wieder abgegeben wird und führt zu sehr steilen Temperaturgradienten in Bodennähe. Derart steile Gradienten würden einen konvektiven vertikalen Ausgleich nach sich ziehen. Die warmen Luftmassen würden aufsteigen bis sich ein stabiler Temperaturgradient ausgebildet. Daher ist bei der Berechnung des Wärmetransportes durch die Troposphäre auch der konvektive Term zu berücksichtigen. Als Anhaltspunkt bietet sich der in der US-Standardatmosphäre definierte stabile Temperaturgradient an.

3.1 Beschreibung des Rechenweges

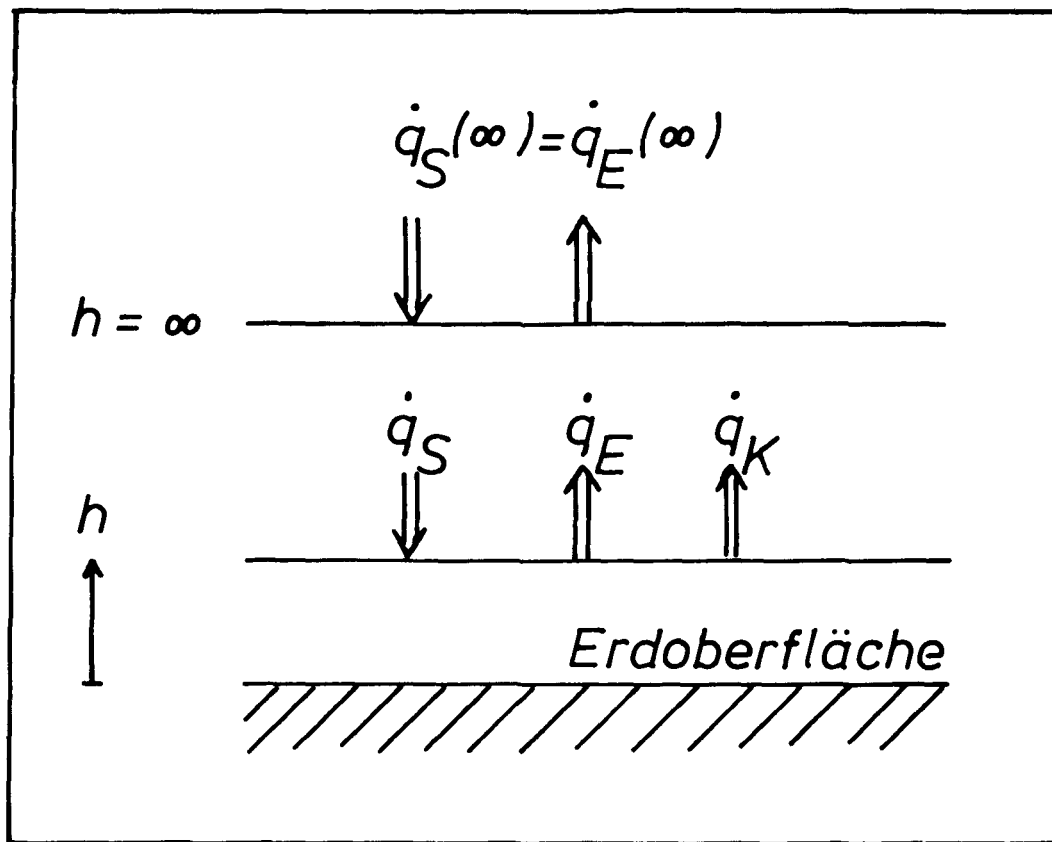


Bild 5: Wärmeströme im eindimensionalen Strahlungs-/Konvektionsmodell

Wie beim planetaren Modell geht man auch beim eindimensionalen Strahlungs-/Konvektionsmodell von einer Gleichgewichtsbetrachtung aus. Für große Höhen ($h \rightarrow \infty$) gilt, daß die einfallende Strahlungsleistung der Sonne $\dot{q}_S(\infty)$ gleich ist der emittierten Strahlungsleistung $\dot{q}_E(\infty)$. Für jede Höhe h verlangt die Gleichgewichtsbedingung, daß die zur Erdoberfläche gerichtete

Strahlung $\dot{q}_S(h)$ gleich ist der Summe aus von der Erdoberfläche weggerichteter Strahlung $\dot{q}_E(h)$ und konvektivem Wärmestrom $\dot{q}_K(h)$.

$$\dot{q}_S(T(h), p(h), p_i(h), \dots) = \dot{q}_E(T(h), p(h), p_i(h), \dots) + \dot{q}_K(h)$$

Die Strahlungsterme sind unter anderem abhängig von der Temperatur T , dem Druck p und den Partialdrücken p_i der strahlungsaktiven Gase in der Höhe h , zu denen neben CO_2 noch andere gehören. Gesucht ist nun das Temperaturprofil $T(h)$ in der Atmosphäre, für das die oben genannte Bedingung erfüllt ist. Hierzu ist eine weitere Aufschlüsselung der Wärmeströme erforderlich. Die zur Erde gerichtete Strahlung \dot{q}_S setzt sich zusammen aus der kurzwelligen Sonnenstrahlung \dot{q}_{SW}^- und der langwelligen Strahlung der oberen Atmosphärenschichten \dot{q}_{LW}^- .

$$\dot{q}_S(h) = \dot{q}_{SW}^-(h) + \dot{q}_{LW}^-(h)$$

Die von der Erdoberfläche weggerichtete Strahlung \dot{q}_E entspricht der Summe von reflektierter kurzwelliger Sonnenstrahlung \dot{q}_{SW}^+ und langwelliger Strahlung der Erdoberfläche und unteren Atmosphärenschichten \dot{q}_{LW}^+ .

$$\dot{q}_E(h) = \dot{q}_{SW}^+(h) + \dot{q}_{LW}^+(h)$$

Der Index (+/-) gibt die Richtung des jeweiligen Strahlungsstromes an.

Bei der Berechnung des konvektiven Terms \dot{q}_K geht man zunächst von der Annahme des Strahlungsgleichgewichts aus. Deren Ergebnis ist ein Temperaturverlauf in der Atmosphäre, wie ihn Kurve (3) in Bild 4 beschreibt. Nun gilt es, eine Fallunterscheidung vorzunehmen. Ist der Temperaturgradient größer oder gleich dem vorher zu definierenden stabilen, existiert kein konvektiver Wärmestrom. Ist der Gradient aber niedriger, dann muß aus Stabilitätsgründen die Größe \dot{q}_K berücksichtigt werden.

$$\text{I. } \dot{q}_K(h) = 0 \quad \text{wenn } dT/dh \geq -6,5 \text{ K/km}$$

$$\text{II. } \dot{q}_K(h) \neq 0 \quad \text{wenn } dT/dh < -6,5 \text{ K/km}$$

Im zweiten Fall ist der konvektive vertikale Wärmetransport \dot{q}_K proportional der Abweichung zwischen den beiden Temperaturgradienten. Zur Einhaltung der Stabilitätsbedingung wird in unserem Fall die US-Definition der Standardatmosphäre angewendet.

3.2 Isolierte Betrachtung des CO_2 -Effektes

Der Einfluß des CO_2 -Gehaltes in der Atmosphäre auf die in Abschnitt 3.1 vorgestellte Bilanz spiegelt sich wieder in den beiden Strahlungstermen \dot{q}_{LW}^- und \dot{q}_{LW}^+ , der langwelligen Strahlung von Erdoberfläche und Atmosphäre. Die Aktivität des CO_2 im UV-Bereich (Sonnenstrahlung) ist niedrig im Vergleich zum IR-Bereich (terrestrische Strahlung) und kann daher für eine erste Abschätzung vernachlässigt werden. Die Berechnung der langwelligen Strahlung nach oben erfolgt über die spektrale Strahlintensität L_λ aus der Gleichung

$$\dot{q}_{\text{LW}}^+ (h) = \pi \int_{\text{LW}} L_\lambda (h) d\lambda$$

Die spektrale Strahlintensität an der oberen Atmosphärenengrenze $L_\lambda(\infty)$ läßt sich mit Hilfe eines Satelliten messen und eignet sich vorzüglich für eine qualitative Diskussion. Das Ergebnis einer solchen Messung L_λ als Funktion der Wellenlänge λ , aufgenommen vom amerikanischen Satelliten Iris, zeigt Bild 6.

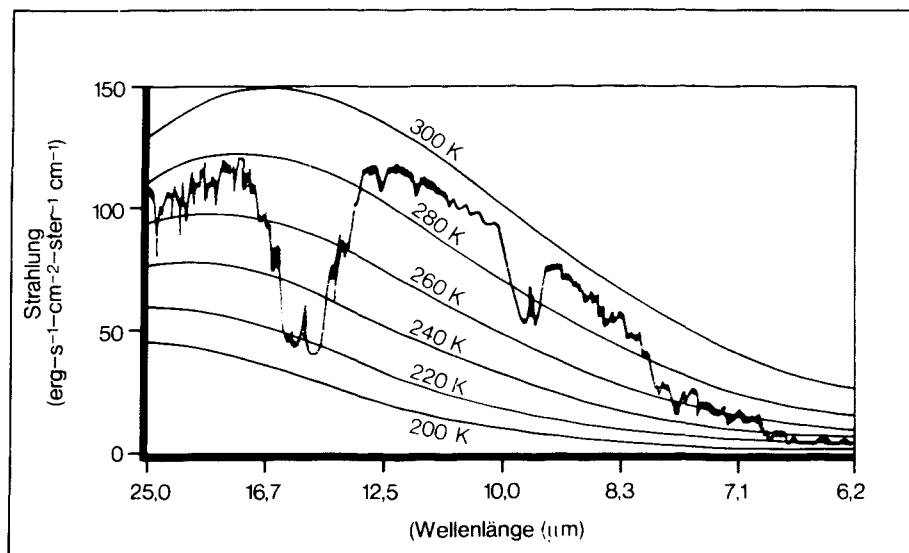


Bild 6: Spektrum der Erde im Infrarot-Bereich /7/

Der Meßkurve überlagert sind die berechneten Intensitätsverläufe von schwarzen Strahlern der jeweiligen Temperatur, die dem Planck'schen Gesetz gehorchen. Man sieht in Bild 6, daß die gemessene terrestrische Strahlintensität im Bereich der Wellenlängen zwischen 10 und 12 μm der eines schwarzen Strahlers von etwa 288 Kelvin entspricht. Dies ist die beobachtete mittlere Oberflächentemperatur der Erde (siehe dazu Abschnitt 2). Man nennt dieses Wellenlängenintervall auch das thermische Fenster der Erde. Strahlung dieser Wellenlänge passiert nahezu ungehindert die Atmosphäre; der Transmissionsgrad ist 1.

Sehr viel niedriger ist der Transmissionsgrad im Bereich von 15 μm . In diesem Wellenlängenbereich absorbiert und emittiert CO_2 . Ein CO_2 -Anstieg in Bodennähe führt zur sogenannten Druckverbreiterung dieser Absorptionsbande. Vereinfacht dargestellt bewirkt eine Erhöhung der Kohlendioxidkonzentration eine Zunahme der Absorption. Zur Beschreibung des funktionalen Zusammenhangs wird in Bodennähe mit der genannten Druckverbreiterung und in höheren Atmosphärenschichten mit der Temperaturverbreiterung (Dopplerverbreiterung) gerechnet. Eine Vergrößerung der Absorptionsbande hätte aber ein Anheben der terrestrischen Strahlintensität, beispielsweise im Bereich des thermischen Fensters, zur Folge, was gleichbedeutend wäre mit einer Erhöhung der Erdoberflächentemperatur. Dies läßt sich leicht veranschaulichen anhand der Definition des Strahlungsterms $\dot{q}_{\text{LW}}^+(\infty)$. Die von der Erde weggehende Strahlung $\dot{q}_{\text{LW}}^+(\infty)$ ist gleich dem Integral der spektralen Strahlintensität $L_\lambda(\infty)$ über die Wellenlänge oder gleich der in Bild 6 von den Koordinatenachsen und L_λ aufgespannten Fläche. $\dot{q}_{\text{LW}}^+(\infty)$ an der oberen Atmosphären Grenze ist jedoch invariant, solange sich die Strahlungsleistung der Sonne nicht ändert und die Erde sich im thermischen Gleichgewicht befindet (siehe Randbedingung in Bild 5). Somit ist aber auch die Fläche unter L_λ in Bild 6 invariant, und eine Aufweitung der Absorptionsbande führt zu einer Anhebung der Erdoberflächentemperatur.

Auf weitere Absorptionsbanden, die in Bild 6 zu erkennen sind, werde ich in einem anderen Zusammenhang (Abschnitt 3.3) noch eingehen und zunächst die Quantifizierung des CO_2 -Einflusses vornehmen. Hierzu bietet sich die Betrachtung der Wärmeströme in Bodennähe ($h = 0$) an, zumal uns als Ergebnis der Rechnung die Erdoberflächentemperatur T_s am meisten interessiert.

Die Mehrzahl der stationären Strahlungs-/Konvektionsmodelle geht aus von einer CO_2 -Verdopplung in der Atmosphäre. Die damit verbundene Temperaturerhöhung ΔT_s an der Erdoberfläche läßt sich bei Kenntnis der Wärmeströme in Bild 7 berechnen.

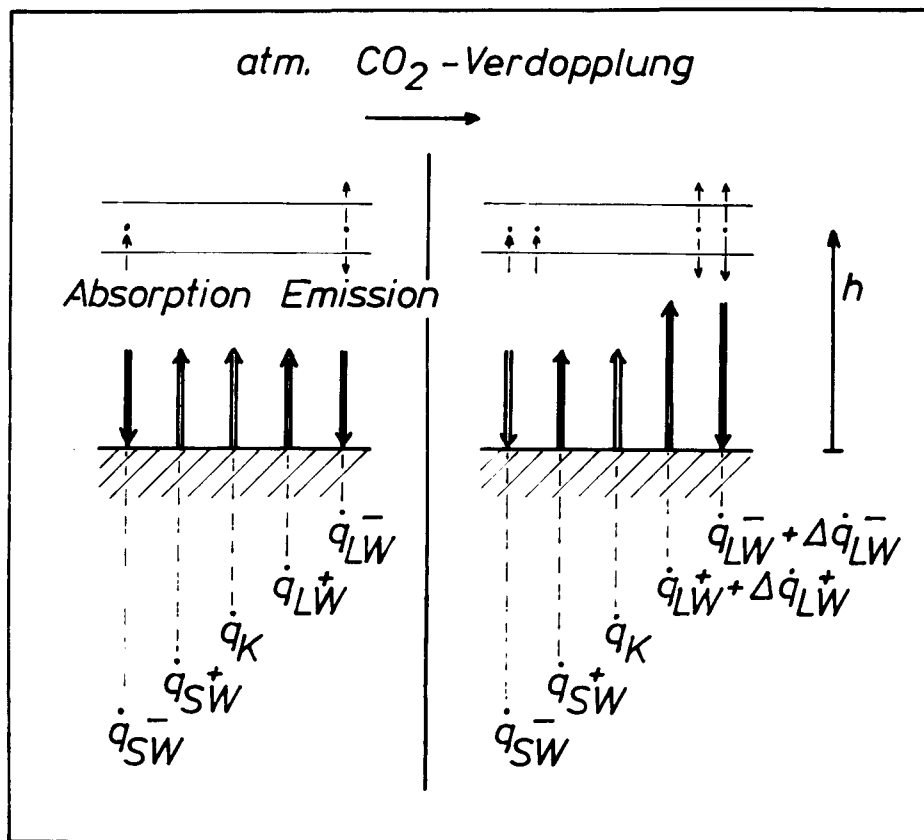


Bild 7: Wärmeströme im eindimensionalen Strahlungs-/Konvektionsmodell (Erdoberfläche)

In der Skizze (Bild 7) finden wir die bekannten Größen, die einfallende kurzwellige Sonnenstrahlung \dot{q}_{SW}^- , die reflektierte Sonnenstrahlung \dot{q}_{SW}^+ , den konvektiven Wärmestrom \dot{q}_K , die langwellige Strahlung der Erdoberfläche $\dot{q}_{LW}^+(o)$ und die langwellige Strahlung der oberen Atmosphärenschichten \dot{q}_{LW}^- . Da CO_2 im UV-Bereich nur sehr schwach aktiv ist, ändert sich an den kurzwelligen Strahlungstermen bei einer CO_2 -Verdopplung nahezu nichts. Wohl

aber wird die langwellige atmosphärische Strahlungsleistung größer, und zwar nach einer Berechnung von Ramanathan /8/ mit dem eindimensionalen Strahlungs-/Konvektionsmodell um

$$\Delta \dot{q}_{LW}^-(0) = 1,2 \text{ W/m}^2$$

bei einer Verdopplung des atmosphärischen CO_2 -Gehaltes. Also nimmt die Erdoberfläche mehr Wärme auf, die sie zur Einstellung eines neuen Gleichgewichtes durch zusätzliche konvektive Wärmeabfuhr oder durch Erhöhung der langwelligen Abstrahlung um $\Delta \dot{q}_{LW}^+(h=0)$ kompensieren muß.

Ich möchte einmal unterstellen, daß letzteres der Fall ist. Dann läßt sich eine Temperaturerhöhung an der Erdoberfläche mit Hilfe des bereits früher erwähnten Gesetzes von Stefan-Boltzmann berechnen. Durch Auflösen nach der Oberflächentemperatur T_s erhält man

$$T_s = \sqrt[4]{\frac{\dot{q}_{LW}^+(o)}{\sigma}}$$

Bei einer Erhöhung der langwelligen Abstrahlung $\dot{q}_{LW}^+(o)$ steigt die Erdoberflächentemperatur um

$$\frac{dT_s}{d \dot{q}_{LW}^+(o)} = \frac{1}{4 \sigma T_s^3}$$

$$\frac{dT_s}{d \dot{q}_{LW}^+(o)} = 0,18 \frac{\text{K}}{\text{W/m}^2}$$

Wird der zusätzliche Wärmestrom $\Delta \dot{q}_{LW}^-(o)$ ausschließlich durch langwellige Abstrahlung $\dot{q}_{LW}^+(o)$ der Erdoberfläche kompensiert, erhalten wir, in Anlehnung an das Ergebnis von Ramanathan /8/, bei einer atmosphärischen CO_2 -Verdopplung und bei ausschließlicher Betrachtung der Infrarot-Aktivität dieses Gases eine resultierende Temperaturerhöhung an der Erdoberfläche um

$$\Delta T_s = 0,22 \text{ K}$$

3.3 Rückkopplungsmechanismen

Wenn man sich das Emissionsspektrum der Erde in Bild 6 ansieht, erkennt man noch weitere Absorptionsbanden. Hier gilt es, insbesondere das Ozon zu nennen, dessen Absorptionsbande im Infraroten sich bei einer Wellenlänge von $9\text{ }\mu\text{m}$ befindet, und den Wasserdampf. Der Wasserdampf ist im wesentlichen verantwortlich für die Abweichung des gemessenen Spektrums von dem des schwarzen Körpers unterhalb von $8\text{ }\mu\text{m}$ sowie oberhalb von $16\text{ }\mu\text{m}$.

Kommt es nun bedingt durch einen CO_2 -Anstieg zu einer Temperaturerhöhung in der Troposphäre - bei konstantem stabilen Temperaturgradienten -, so erhöht sich bei der Einstellung eines neuen Gleichgewichtes auch die Infrarot-Aktivität dieser beiden Gase. Dies ist ein erster Rückkopplungsmechanismus, der zu einer zusätzlichen Erwärmung der Erdoberfläche führt. Der Zahlenwert nach Ramanathan /8/ für den durch diesen Vorgang bedingten Zugewinn an infraroter Wärmestrahlung der Atmosphäre zur Erdoberfläche beträgt $2,3\text{ W/m}^2$ und ist somit höher als der zuvor aufgrund des reinen CO_2 -Effektes berechnete. Die Nettotemperaturänderung an der Erdoberfläche betrüge dann

$$\Delta T_s = 0,5\text{ K}$$

bei einer CO_2 -Verdopplung.

Nun wird man mit Recht einwenden, daß es nicht sehr wahrscheinlich ist, daß die zusätzlich empfangene Wärmeleistung ausschließlich durch eine Erhöhung der terrestrischen Strahlungsleistung kompensiert wird. Da zwei Drittel unseres Planeten von Wasser bedeckt sind, sollte diese Kompensation viel eher durch latenten Wärmeübergang erfolgen, also durch Verdampfung von Oberflächenwasser. Zieht man diese Möglichkeit in Betracht, muß man die sogenannte Wasserdampfrückkopplung in die Rechnung miteinbeziehen. Der Anstieg des atmosphärischen Wasserdampfgehaltes als Folge eines vorausgegangenen CO_2 -Anstiegs in der Atmosphäre zieht eine zusätzliche Erhöhung der Erdoberflächentemperatur nach sich.

Ramanathan /8/ hat diese beiden Rückkopplungsmechanismen in seine Rechnung miteinbezogen und erhält als Ergebnis eine mittlere Temperaturerhöhung an der Erdoberfläche von

$$\Delta T_s = 2,2 \text{ K}$$

bei Verdopplung des heutigen atmosphärischen CO_2 -Gehaltes. Die Beiträge, die den einzelnen Rückkopplungsmechanismen zuzuordnen sind, können der folgenden Tabelle entnommen werden.

	$\Delta \dot{q}_{\text{LW}}^- (0)$		ΔT_s
	W/m^2	%	K
IR - Aktivität des CO_2	1.2	8	0.17
IR - Aktivität von Ozon und Wasserdampf nach Erhöhung der bodennahen Lufttemperaturen	2.3	15	0.33
Wasserdampfrückkopplung	12.0	77	1.70
gesamt	15.5	100	2.20

Tabelle Temperaturerhöhung an der Erdoberfläche ΔT_s
nach Ramanathan /8/

Die Rechnung, auf der diese Werte basieren, geht aus von einer konstanten relativen Luftfeuchte. Modelle, die mit einer konstanten absoluten Luftfeuchte rechnen, schließen eine Kompensation der Zunahme an atmosphärischer Strahlungsleistung durch latenten Wärmeübergang aus und kommen demzufolge zu niedrigeren Werten der Temperaturerhöhung. Bemerkenswert ist die Höhe des Beitrags, der durch die Wasserdampfrückkopplung geliefert wird (siehe Tabelle).

Bevor man etwas über die Aussagekraft dieses Ergebnisses sagen kann, gilt es, noch weitere Mechanismen anzusehen, die in dieser Rechnung nicht berücksichtigt wurden. Als Beispiel für einen weiteren Rückkopplungsmechanismus möchte ich die Wolken/Albedo-Rückkopplung anführen, die im Gegensatz zu den beiden vorgenannten kompensatorisch wirkt. In Analogie zur Wasserdampf-Rückkopplung steigt der atmosphärische Wasserdampfgehalt mit dem CO_2 -Gehalt der Atmosphäre. Denkbar ist nun eine größere Wolkenbedeckung und damit verbunden eine höhere Albedo. Die an der Erdoberfläche ankommende Sonnenstrahlung verringert sich, die Konsequenz ist eine Abkühlung.

Weitere Rückkopplungsmechanismen, die ausgelöst werden durch einen CO_2 -Anstieg in der Atmosphäre werden in der Literatur diskutiert; deren Ausführung würde jedoch den Rahmen dieses Vortrags sprengen.

3.4 Begleitende Kompensations- und Verstärkungsmechanismen

Für eine zuverlässige Klimaprognose sind jedoch - horribile dictu - noch weitere den CO_2 -Anstieg begleitende Entwicklungen zu berücksichtigen, die einen Temperaturanstieg an der Erdoberfläche sowohl fördern als auch hemmen können. Einige Beispiele für atmosphärische Spurengase, die ebenfalls im Infraroten absorbieren, zeigt Bild 8. Die Zahlenwerte sind der Arbeit von Hansen /9/ entnommen.

Hier ist als Vertreter der Stickoxide das N_2O aufgeführt, dessen Verdopplung eine Temperaturerhöhung um 0,5 Kelvin zur Folge hätte. Die als Treibgase und als Kühlmittel verwendeten chlorierten Fluorkohlenstoffverbindungen, als deren Vertreter das CCl_2F_2 in Bild 8 aufgeführt ist, sind im Infrarotbereich derart aktiv, daß bereits Änderungen im ppb-Bereich die Erdoberflächentemperatur merklich beeinflussen können. Ein ansteigender Methangehalt der Atmosphäre hat ähnliche Konsequenzen. Bezüglich des Ozongehaltes existiert die Ungewißheit, ob mit einem Anstieg als Folge der NO_x -Umsetzung oder mit einer Abnahme als Folge der CCl_2F_2 -Zersetzung zu rechnen ist. Dies zeigt auch die ganze Problematik bei der Behandlung der im allgemeinen sehr reaktionsfreudigen Spurengase.

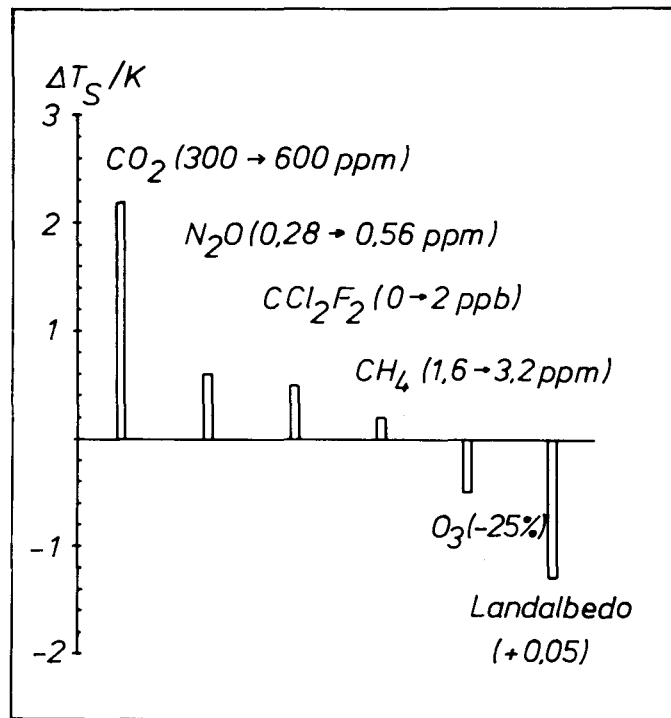


Bild 8: Den CO_2 -Anstieg begleitende Kompensations- und Verstärkungsmechanismen

Im Gegensatz zum CO_2 ist hier die Annahme einer homogenen Verteilung in der Atmosphäre nur sehr schwer zu vertreten.

Als weiterer Kompensationsmechanismus muß eine zunehmende Versteppung der Erdoberfläche genannt werden. Dies ist die Konsequenz von Rodung und falscher Kultivierung. Die damit verbundene höhere Landalbedo führt zu einer verstärkten Reflektion der einfallenden Sonnenstrahlung und zu einer Abkühlung der Erdoberfläche.

Dies sind nur einige Beispiele von denkbaren Kompensations- und Verstärkungsmechanismen, die eine Prognose der Temperaturänderung erschweren und die große Streubreite der Ergebnisse bisheriger Rechnungen erklären.

4. Zusammenfassung

In Bild 9 sind die Ergebnisse aus verschiedenen Rechnungen zusammengestellt. Neben dem eindimensionalen Strahlungs-/Konvektionsmodell, das ich Ihnen vorgestellt habe, gibt es noch detaillierte zwei- und dreidimensionale Modelle.

Bevor man etwas über die Aussagekraft dieses Ergebnisses sagen kann, gilt es, noch weitere Mechanismen anzusehen, die in dieser Rechnung nicht berücksichtigt wurden. Als Beispiel für einen weiteren Rückkopplungsmechanismus möchte ich die Wolken/Albedo-Rückkopplung anführen, die im Gegensatz zu den beiden vorgenannten kompensatorisch wirkt. In Analogie zur Wasserdampf-Rückkopplung steigt der atmosphärische Wasserdampfgehalt mit dem CO_2 -Gehalt der Atmosphäre. Denkbar ist nun eine größere Wolkenbedeckung und damit verbunden eine höhere Albedo. Die an der Erdoberfläche ankommende Sonnenstrahlung verringert sich, die Konsequenz ist eine Abkühlung.

Weitere Rückkopplungsmechanismen, die ausgelöst werden durch einen CO_2 -Anstieg in der Atmosphäre werden in der Literatur diskutiert; deren Ausführung würde jedoch den Rahmen dieses Vortrags sprengen.

3.4 Begleitende Kompensations- und Verstärkungsmechanismen

Für eine zuverlässige Klimaprognose sind jedoch - horribile dictu - noch weitere den CO_2 -Anstieg begleitende Entwicklungen zu berücksichtigen, die einen Temperaturanstieg an der Erdoberfläche sowohl fördern als auch hemmen können. Einige Beispiele für atmosphärische Spurengase, die ebenfalls im Infraroten absorbieren, zeigt Bild 8. Die Zahlenwerte sind der Arbeit von Hansen /9/ entnommen.

Hier ist als Vertreter der Stickoxide das N_2O aufgeführt, dessen Verdopplung eine Temperaturerhöhung um 0,5 Kelvin zur Folge hätte. Die als Treibgase und als Kühlmittel verwendeten chlorierten Fluorkohlenstoffverbindungen, als deren Vertreter das CCl_2F_2 in Bild 8 aufgeführt ist, sind im Infrarotbereich derart aktiv, daß bereits Änderungen im ppb-Bereich die Erdoberflächentemperatur merklich beeinflussen können. Ein ansteigender Methangehalt der Atmosphäre hat ähnliche Konsequenzen. Bezüglich des Ozongehaltes existiert die Ungewißheit, ob mit einem Anstieg als Folge der NO_x -Umsetzung oder mit einer Abnahme als Folge der CCl_2F_2 -Zersetzung zu rechnen ist. Dies zeigt auch die ganze Problematik bei der Behandlung der im allgemeinen sehr reaktionsfreudigen Spurengase.

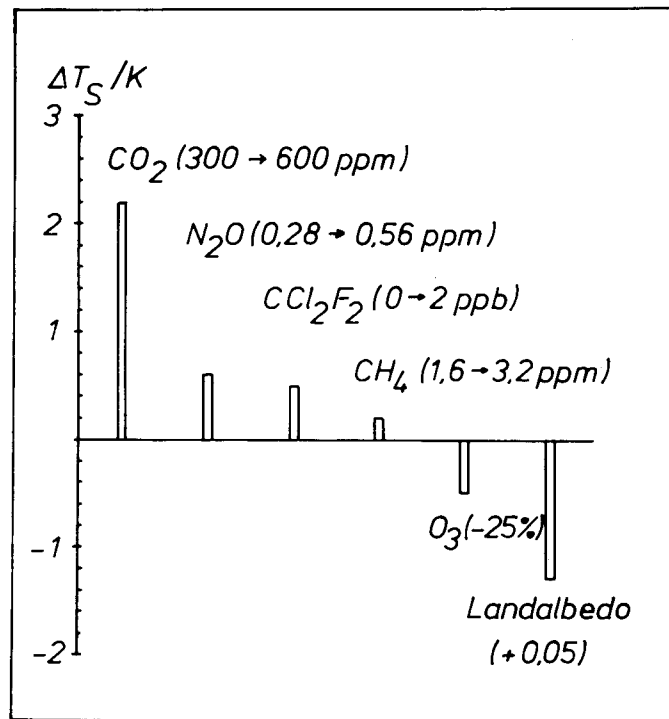


Bild 8: Den CO_2 -Anstieg begleitende Kompensations- und Verstärkungsmechanismen

Im Gegensatz zum CO_2 ist hier die Annahme einer homogenen Verteilung in der Atmosphäre nur sehr schwer zu vertreten.

Als weiterer Kompensationsmechanismus muß eine zunehmende Versteppung der Erdoberfläche genannt werden. Dies ist die Konsequenz von Rodung und falscher Kultivierung. Die damit verbundene höhere Landalbedo führt zu einer verstärkten Reflektion der einfallenden Sonnenstrahlung und zu einer Abkühlung der Erdoberfläche.

Dies sind nur einige Beispiele von denkbaren Kompensations- und Verstärkungsmechanismen, die eine Prognose der Temperaturänderung erschweren und die große Streubreite der Ergebnisse bisheriger Rechnungen erklären.

4. Zusammenfassung

In Bild 9 sind die Ergebnisse aus verschiedenen Rechnungen zusammengestellt. Neben dem eindimensionalen Strahlungs-/Konvektionsmodell, das ich Ihnen vorgestellt habe, gibt es noch detaillierte zwei- und dreidimensionale Modelle.

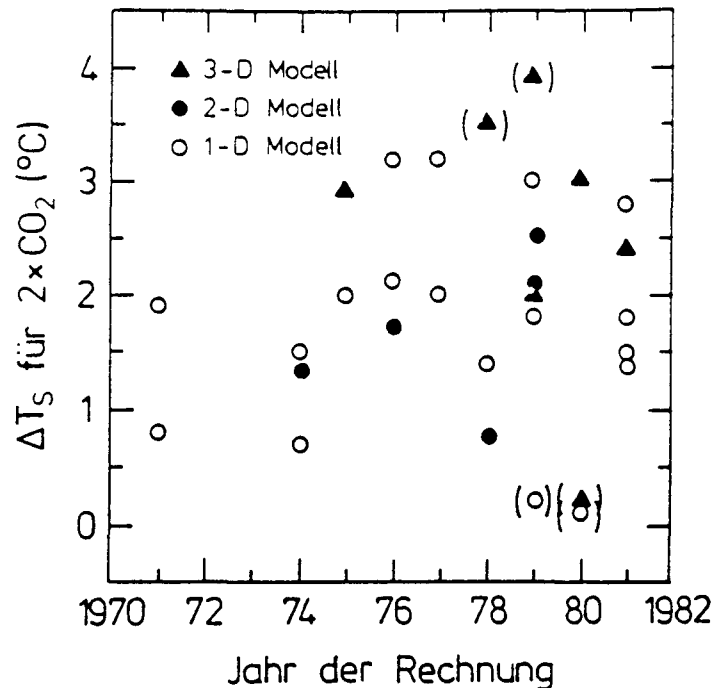


Bild 9 Temperaturanstieg an der Erdoberfläche bei Verdopplung des atmosphärischen CO_2 -Gehaltes
Ergebnisvergleich nach Clark /4/

Die ΔT_s -Werte unter einem Grad bei einer Verdopplung des atmosphärischen CO_2 -Gehaltes sind im wesentlichen das Ergebnis einer ausschließlichen Betrachtung der Infrarot-Aktivität des CO_2 , Werte um ein Grad sind das Ergebnis von Modellen, die mit fester absoluter Feuchte rechnen. Modelle, die mit einer konstanten relativen Feuchte rechnen, also die Wasserdampfrückkopplung berücksichtigen, haben Temperaturerhöhungen um 2 bis 3 Grad zum Ergebnis. Der Vergleich mit komplexen mehrdimensionalen Modellen wurde ermöglicht durch eine örtliche Mittelung der jeweiligen Ergebnisse.

Wie lautet nun die Antwort auf die Frage, die eingangs im Thema dieses Vortrages gestellt wird? Ist eine globale Temperaturerhöhung als Folge des zunehmenden atmosphärischen CO_2 -Gehaltes vorhersagbar?

Die Antwort lautet ja, wenn wir den CO_2 -Einfluß, die Infrarot-Aktivität dieses Gases, isoliert betrachten, wenn auch der Effekt klein ist.

Die Antwort lautet ja, wenn wir die Wasserdampfdruckkopplung betrachten. Ich habe versucht, Ihnen zu zeigen, daß der CO_2 -Anstieg nur ein auslösender Faktor ist, und daß die positiven Rückkopplungsmechanismen die dominierende Rolle bei der Erhöhung der Oberflächentemperatur spielen.

Somit kommt dem Wasserkreislauf und den damit verbundenen Annahmen in der Rechnung entscheidende Bedeutung zu. Mit der Güte dieser Annahmen, die es durch Beobachtung abzusichern gilt, steigt und fällt die Aussagekraft des Ergebnisses. Wir sind bis heute nicht in der Lage, zu sagen, ob es sich bei der jeweiligen Rechnung um eine konservative Abschätzung handelt; eine obere und untere Grenze der zu erwartenden Änderung der Oberflächentemperatur läßt sich noch nicht festlegen, da wir es bei den Rückkopplungsmechanismen sowohl mit verstärkenden als auch mit kompensierenden Vorgängen zu tun haben. Ferner sind für eine zuverlässige Prognose auch begleitende Entwicklungen, etwa der atmosphärische Gehalt an IR- und UV-aktiven Spurengasen, zu berücksichtigen.

Trotz dieser Ungewißheiten besteht Übereinstimmung dahingehend, daß wir durch das Verbrennen der fossilen Brennstoffvorräte in wenigen Jahrzehnten, für deren Anhäufung die Natur Jahrmillionen benötigte, ein geophysikalisches Experiment größten Stils gestartet haben. Mit den möglichen Ergebnissen dieses Experimentes müssen wir uns heute schon auseinandersetzen. Da Gegenmaßnahmen, wie eine bessere Primärenergieausnutzung und ein verstärkter Zugriff auf Primärenergieträger, die keinen Kohlenstoff enthalten, nur langfristig greifen, müssen wir uns die Frage stellen, ob wir es uns leisten können, abzuwarten bis die Rechnung durch die Beobachtung bestätigt wird.

Der Autor dankt Herrn Dr. A. Volz vom Institut
für atmosphärische Chemie (ICH 3) der KFA Jülich
für die fachliche Beratung bei der Erstellung dieses Vortrags

LITERATURVERZEICHNIS

- /1/ Svante Arrhenius
Erde und Weltall
Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1926

- /2/ Revelle, R.
Carbon dioxide and world climate
Scientific American 247, (2), 1982, 33-41

- /3/ Keeling, C.D., Bacastow, R.B.
Impact of industrial gases on climate
in: Energy and Climate, 72-95, 1977
National Academy of Sciences, Washington D.C.

- /4/ Clark, W.C.
Carbon Dioxide Review: 1982
Oxford University Press

- /5/ Rotty, R.M.
The nature of the CO₂ problem: certainties and
uncertainties
Environmental Progress Vol. 3, No. 4, Nov. 1984, 253

- /6/ Flohn, H.
Klimaänderung als Folge der CO₂-Zunahme?
Phys. Blätter 37 (1981) Nr. 7, 184

- /7/ Freyer, H.D.
Globaler Kohlenstoffkreislauf - Wärmehaushalt der Erde
in Jahresbericht 1982/83
der Kernforschungsanlage Jülich GmbH, 31

- /8/ Ramanathan, V.
The Role of Ocean-Atmosphere Interactions in
the CO₂ Climate Problem
Journ. of the atm. sciences, Vol. 38, No. 5, 1981, 918
- /9/ Hansen, J., Johnson, D., Lacis, A., Lebedeff, S.,
Lee, P., Rind, D., Russel, G.
Climate Impact of increasing atmospheric
Carbon Dioxide
Science, Vol. 213, No. 4511, 1981, 957

WEITERFÜHRENDE LITERATUR

- Bach, W.
Gefahr für unser Klima
Verlag C.F. Müller, Karlsruhe (1982)
- Bach, W.
Changes in the composition of the atmosphere and their
impact upon climatic variability - An overview
Bonner Meteorologische Abhandlungen (ISSN 0006-7156)
Heft 24 (1976)
Herausgeber: H. Flohn, Ferd. Dümmler's Verlag, Bonn
- Bach, W., Crane, A.J., Berger, A.L., Longheth, A.
Carbon Dioxide: Current views and developments in
Energy/Climate research
D. Reidel, Publishing Comp. Dordrecht, 1982
- Bach, W., Pankrath, J., Williams, J.
Interactions of Energy and Climate
D. Reidel, Publishing Comp. Dordrecht, 1980
- Kandel, R.S.
Surface temperature sensitivity to increased atmospheric CO₂
Nature, Vol. 293, 1981, 634
- Ramanathan, V., Coakley, J.A.
Climate modeling through radiative-convective models
Reviews of Geophysics and Space Physics
Vol. 16, No. 4, 1978, 465
- Thompson, S.L., Schneider, S.H.
Carbon Dioxide and Climate
Science, Vol. 217, 1982, 1031

- Volz, A.
Studie über die Auswirkungen von Kohlendioxidemissionen
auf das Klima
Berichte der Kernforschungsanlage Jülich GmbH
Jül-Report-1877, Nov. 1983, ISSN 0366-0885

